پایش خوردگی آلیاژهای آلومینیومی در راکتور تحقیقاتی تهران(TRR)

حسین خلفی، رضا قلیزاده آغویه
پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

چکیده:
آلیاژهای آلومینیوم بعنوان غلاف سوختهای هسته ای و فولاد ضد زنگ بعنوان پوشش دیواره استخر راکتور در راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده اند. به منظور بررسی میزان خوردگی فلزات آلومینیوم و فولاد ضد زنگ در راکتور TRR، برنامه پایش خوردگی، طبق دستورالعمل آژانس بین المللی انرژی اتمی انجام گرفت. این برنامه شامل تستهای داخل استخر راکتور، با استفاده از بررسی و مطالعه خوردگی کوپنهای ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم و فولاد ضد زنگ می باشد. در این مقاله بررسی خوردگی غلاف سوختهای مصرف شده ارائه می گردد.

کلمات کلیدی: *کوپن خوردگی، رک خوردگی، سوختهای مصرف شده، خوردگی حفره ای، آزمایش متالوگرافی.*

مقدمه:

راکتور تحقیقاتی تهران از نوع استخری و برای حداکثر قدرت ۵MW طراحی شده است. این راکتور اولین بار در آذرماه ۱۳۴۶ بحرانی شده و در ابتدای شروع بکار با سوخت غنی شده بالا (HEU) ٪۹۳ تحت بهره برداری بوده است و نهایتا" درسال ۱۳۶۸ طبق توصیه آژانس در خصوص تبدیل سوختهای HEU به LEU در راکتورهای تحقیقاتی، سوختهای این راکتور نیز همزمان با بقیه راکتورهای تحقیقاتی با سوختهای با غنای٪۲۰ تعویض شدند. سوختها از نوع MTR بوده و داخل غلاف آلومینیومی با مشخصات ٪۹۹،۶ آلومینیوم خالص با دانسیته $۲،۷gr/cm^{۳}$ و ضخامت ۰،۰۴cm بصورت ساندویچی قرار گرفته اند. برنامه پایش شامل تستهای داخل استخر، با استفاده از کوپنهای خوردگی ساخته شده از آلیاژهای آلومینیوم و فولاد ضد زنگ می باشد[۲]. رک خوردگی در تاریخ ۱۳۸۶،۲،۶ در استخر راکتور غوطه ور شد. آنالیز سطوح خورده شده از این کوپنها، دانسیته و مقدار حفره های ایجاد شده بر روی این سطوح را به ما می دهد که بعنوان تابعی از پارامترهای آب استخر می باشد.

روش کار: کوپنهای خوردگی شامل آلیاژهای آلومینیوم و فولاد ضد زنگ هستند. این کوپنها، دیسکهای مدور، با قطرخارجی ۱۰۰mm، قطر داخلی ۷۰mm و ضخامت ۳mm می باشند. همه کوپنها دارای سوراخ مرکزی می باشند، تا بتوان آنها را در میله فولادی حمایت کننده مرکزی قرار داد. کوپنهای خوردگی از جنس ۱۱۰۰-Al(جنس رک سوختها)،۶۰۶۱-Al(جنس غلاف سوختها)و۳۰۴- AISI(جنس پوشش دیواره استخر) که به

سه شکل کوپل همجنس(Crevice couple)و کوپل غیر همجنس(Galvanic couple)و تکی(Single) تهیه شده‌اند[۲]. ترکیبات شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم و فولاد ضد زنگ در جدول(۱) نشان داده شده است. آماده سازی سطح و عمل پرداخت سطوح کوپنها دقیقا" همانند صفحات سوخت با غلاف آلومینیومی انجام پذیرفت. بعبارتی، همه کوپنها ماشین کاری و شماره گذاری شدند. همچنین این کوپنها پولیش شدند تا بحالت نیمه براق برسند. جهت جلوگیری از تماس کوپنهای تکی و کوپل شده از یکدیگر، از دیسکهای مدور پلی اتیلنی با قطر خارجی ۵۸mm ، قطر داخلی ۳۰mm و ضخامت ۷mm استفاده شد. برای اینکه قسمت داخلی کوپنهای خوردگی به میله حمایت کننده نچسبد، روکش پلی اتیلنی به ضخامت ۱mm بر روی میله مرکزی فولاد ضد زنگ کشیده شد[۲]. میله حمایت کننده مرکزی از جنس فولاد ضد زنگ۳۰۴ با ارتفاع ۳۲۰mm وقطر خارجی ۲۲،۵ mm می باشد.

جدول(۱): ترکیبات شیمیایی آلیاژهای آلومینیوم و فولاد ضدزنگ بر حسب درصد وزنی[۱]

Element	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ti	Zn	Cr	Ni
Al-۱۱۰۰	۱۰۰،۹۹	۰،۱۶	۰،۱	۰،۰۵	۰،۱۶	۰،۴۸	۰،۰۰۵	۰،۰۳	۰،۰۰۵	ـــ
Al–۶۰۶۱	۹۷،۶۹۰	۰،۲۵	۰،۹۴	۰،۱۲	۰،۶۵	۰،۲۴	۰،۰۴	۰،۰۳	۰،۰۴	ـــ
AISI-۳۰۴	ـــ	ـــ	ـــ	۲	۱	۷۰	ـــ	ـــ	۱۹	۸

برای جلوگیری از اتصال رک خوردگی به دیواره استخر، از دو دیسک مدور اکریلیک با قطر ۱۵۰mm و ضخامت ۵mm استفاده شد[۱]. سپس، تمام کوپنها تحت عمل آمایش سطحی قرار گرفتند. یکی از کوپنهای Al-۱۱۰۰ و Al–۶۰۶۱ را که ماشین کاری و پولیش شده‌اند، پس از انجام عملیات آمایش روی آنها، درآب دیونیزه $95^{o}C$ بمدت ۲۴ ساعت غیرفعال(Passivated) می کنیم. جهت شبیه سازی آسیبهای مکانیکی که معمولا" هنگام جابجایی سوختها اتفاق می افتند، روی یکی از سطوح این کوپنها، خراشی به عمق و پهنای ۰،۵ mm ایجاد گردید[۲]. کوپنهای خوردگی طبق چیدمان جدول(۲) از بالا به پائین در رک خوردگی چیده شدند.

جدول(۲): ترتیب چیدمان کوپنها در رک خوردگی از بالا به پائین

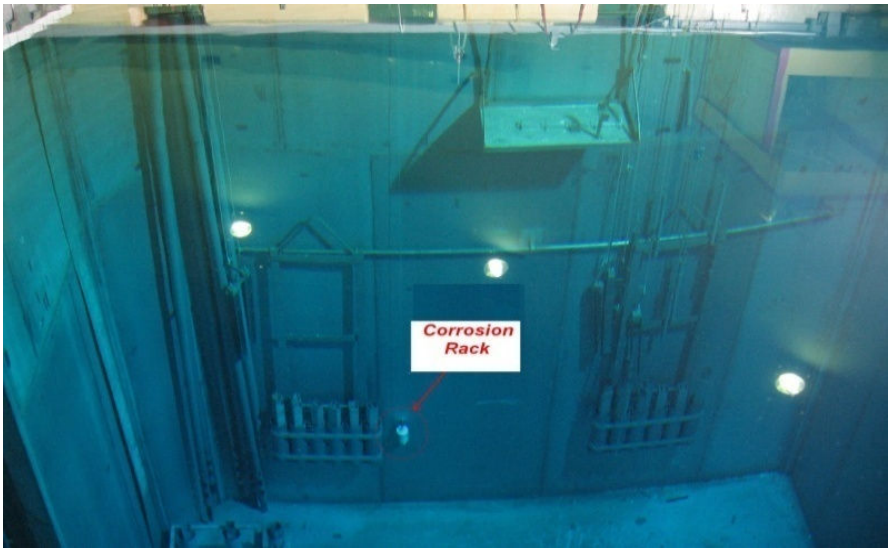
شرایط	آلیاژها	وضعیت
	Al–۶۰۶۱	تکی(Uncoupled)
	Al-۱۱۰۰	تکی (Uncoupled)
	AISI-۳۰۴	تکی (Uncoupled)
Scratched &Pre-oxidized	Al–۶۰۶۱	تکی (Uncoupled)
Scratched& Pre-oxidized	Al-۱۱۰۰	تکی (Uncoupled)
	Al–۶۰۶۱&Al–۶۰۶۱	کوپل(Coupled)
	Al-۱۱۰۰& Al–۶۰۶۱	کوپل(Coupled)
	AISI-۳۰۴& Al–۶۰۶۱	کوپل(Coupled)
	Al-۱۱۰۰&Al-۱۱۰۰	کوپل(Coupled)
	Al–۶۰۶۱& Al-۱۱۰۰	کوپل(Coupled)
	AISI-۳۰۴& Al-۱۱۰۰	کوپل(Coupled)
	AISI-۳۰۴&AISI-۳۰۴	کوپل(Coupled)

شکل۱، رک خوردگی بعد از چیدن کوپنها و قبل از قرار دادن آن در استخر راکتور را نشان می دهد.

۲

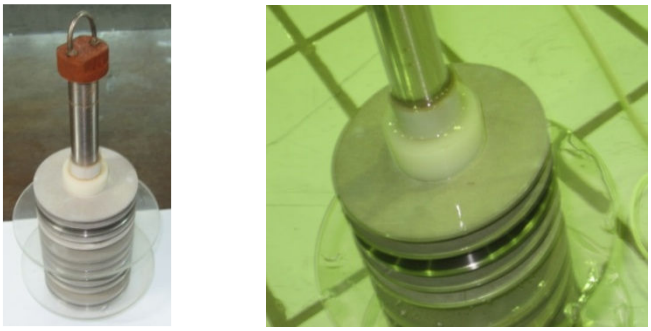
شکل(۱): رک خوردگی تهیه شده جهت بررسی خوردگی

رک خوردگی در عمق ۸،۵m از سطح استخر و به فاصله ۲۰cm از سوختهای هسته‌ای مصرف شده، قرار داده شد[۱]. قبل از چیدن کوپنهای خوردگی در رک خوردگی از هر دو طرف تمام آنها توسط دوربین عکسبرداری شد تا با عکسهای بعد از برداشتن از آب مقایسه شوند. شکل(۲) موقعیت رک خوردگی را در داخل استخر راکتور نشان می دهد.



شکل(۲): موقعیت رک خوردگی در محل نگهداری سوختهای مصرف شده در داخل استخر راکتور

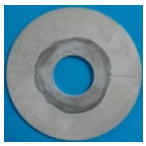
نتایج: رک خوردگی در ۱۳۸۶،۵،۶ از استخر راکتور بیرون کشیده شد و برای شناسایی انواع خوردگی مورد ارزیابی قرار گرفت. قبل از جدا کردن کوپنهای خوردگی از رک خوردگی،pH آب بر روی سطح خارجی کوپنها برابر۵ بود، در حالیکهpH آب در سطوح داخلی کوپلهای کوپنها، برابرpH=۴،۵ بود که نشان از شرایط اسیدی بالاتر در داخل کوپنهای کوپل شده بود معنای این تغییر pH این است که در غلاف سوختهای هسته ای نیز که دارای خلل و فرج فراوان هستند شرایط اسیدی تر بوده و زودتر خورده می شوند. تمامی کوپنها، مخصوصا" کوپنهای با کوپل هم جنس دچار تغییر رنگ شده بودند. فقط دو کوپن Al-۶۰۶۱ و Al-۱۱۰۰ که غیر فعال شده بودند، نسبت به قبل از شناور ساختن داخل آب دچار تغییر رنگ نشده بودند. لایه های اکسیدی محافظ تشکیل شده بر روی کوپنها نیز، دارای ضخامت تقریبی ۱ µm می باشند که به دو شکل یکنواخت(Even) و غیر یکنواخت(Uneven)، بر روی ۳سطوح داخلی کوپنهای کوپل شده گالوانیکی و شیاری تشکیل شده بودند. شکل۳، وضعیت رک خوردگی، بعد از ۳ ماه غوطه وری در استخر راکتور را نشان می دهد.



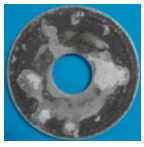
شکل(۳): وضعیت رک خوردگی بعد از ۳ ماه ماندن در داخل استخر راکتور تهران

کوپنهای خوردگی از رک خوردگی برداشته شدند و از هر دو وجه آنها توسط دوربین عکسبرداری شد. روی تمام کوپنها ارزیابی خوردگی حفره ای(Pitting) انجام شد. در شکل ۴ تصاویر برخی از این کوپنها ارائه شده است.

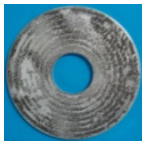
۱)Uncoupled Al–۶۰۶۱,SideA



۲)Uncoupled Al-۱۱۰۰,SideB(Pre-oxidized & Scratched)

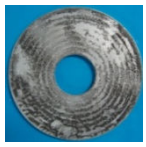


۳)Galvanic Coupled Al-۱۱۰۰
SideB,Internal Surface



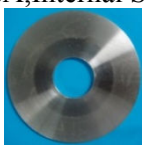
۴)Crevice Coupled Al-۱۱۰۰
SideB,Internal Surface

۵)Crevice Coupled Al-۱۱۰۰
SideB,InternalSurface



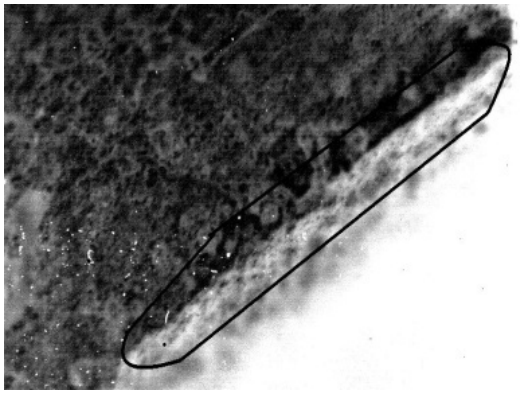
۶)Galvanic Coupled Al-۱۱۰۰
SideA,Internal Surface

۷)Galvanic Coupled Al-۱۱۰۰
SideA,Internal Surface

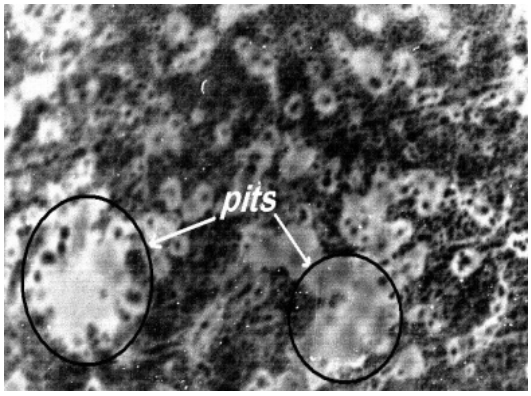


۸)Crevice Coupled S.S-۳۰۴
SideB,External Surface

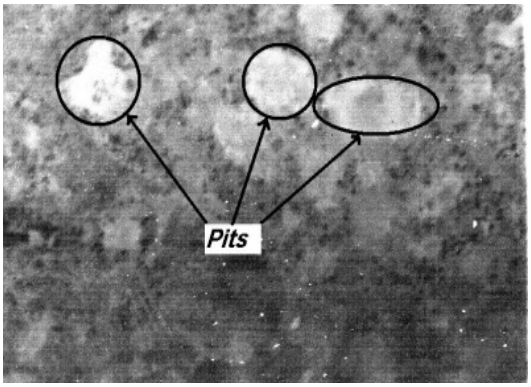
شکل(۴): کوپنهای خوردگی، بعد از ۳ ماه قرار داشتن درمجاورت سوختهای مصرف شده در راکتور تهران بجز کوپنهای غیر فعال شده که دارای شیار بودند، تقریبا" تمامی کوپنها، مخصوصا" در نزدیکی مرکز کوپنها دچار خوردگی حفره ای شده بودند. برای تعیین میزان خوردگی کوپنهای خوردگی، از روش متالوگرافی استفاده گردید[۳]. در آزمایش متالوگرافی از یک میکروسکوپ که مجهز به دوربین عکاسی بود ، جهت ضبط مشاهدات استفاده گردید، که از نوع (Reflected Optical Microscope,Equipped With Camera) بوده و قابلیت بزرگنمایی های مختلف را داشت. چند نمونه از تصاویر گرفته شده توسط این میکروسکوپ در اشکال ۵ تا ۸ ارائه گردیده است.



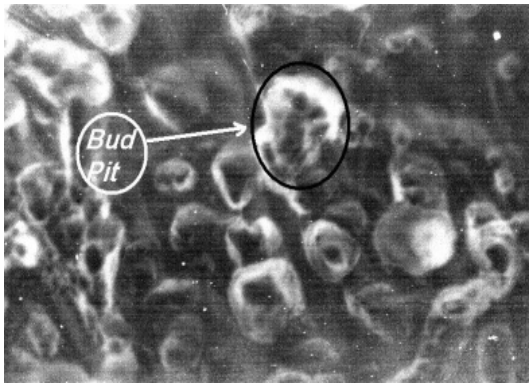
شکل(۵): نمایی از لبه کوپن تکی Al-۶۰۶۱ با بزرگنمایی(M×۲۰۰)



شکل(۶): حفره های ایجاد شده بر سطح بیرونی کوپن تکی Al-۶۰۶۱ با بزرگنمایی(M×۲۰۰)



شکل(۷): حفره های ایجاد شده درسطح بیرونی کوپن Al-۶۰۶۱ درکوپل شیاری با بزرگنمایی(M×۲۰۰)



شکل(۸): جوانه حفره ایجاد شده بر روی سطح بیرونی کوپن Al-۱۱۰۰ با بزرگنمایی(M×۵۰۰)

شیمی آب استخر راکتور که به مدت ۳ ماه بر روی رک خوردگی تاثیر داشت، در جدول(۳) ارائه شده است.

جدول(۳): آنالیز آب استخر راکتور تحقیقاتی تهران (TRR) و مقادیر استاندارد عناصر موجود[۴]

عنصر	Cl^-	NO_2^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na	Li	Sr	Mn	Cs	Zn	pH	Conductivity
موجود در آب استخر راکتور (mg/lit)	۰،۰۹	۰،۰۹۲	۰،۲	۰،۲۳	۰،۰۲	۰،۰۱۵	۰،۰۱	۰،۰۱۸	۰،۰۱۵	۰،۰۱۵	۵،۵	۰،۹μS/cm
حداکثرمقدار استاندارد (mg/lit)	۰،۱	۰،۰۲	۰،۰۳	۱	۰،۰۲	۰،۰۴	۰،۰۵	۰،۰۳	ــــ	۰،۰۴	۶،۵	۱μS/cm

بحث و نتیجه گیری: از آنالیز رک خوردگی مورد آزمایش و کوپنها، مشاهدات و نتایج زیر بدست آمدند.

۱- خوردگی حفره ای(Pitting)، تقریبا"در تمام آلیاژهای آلومینیوم اتفاق افتاده بود.

۲- سطوح بالایی کوپنهای تکی و کوپل شده بیشتر خورده شده بودند، چون ذرات ناخالص ریز بیشتری بر روی آنها رسوب کرده بودند.

۳- سطوح کوپنهای فولاد ضدزنگ دچار خوردگی نشده بودند، که نشان از مقاومت بسیار بالای آن دارد.

۴- میزان مقاومت در برابر خوردگی Al-۶۰۶۱ بیشتر از Al-۱۱۰۰ می باشد.

۵- اشعه گامای ساطع شده از پاره های شکافت داخل سوخت، تاثیری بر روی خوردگی غلاف سوختها ندارد، چون اشعه گاما با سرعت بسیار زیاد از غلاف سوخت عبور کرده و هیچگونه تاثیری بر روی ساختار مولکولی آن، بجای نمی گذارد[۲].

۶- عمیق ترین حفره ایجاد شده بر روی کوپن Al-۶۰۶۱ ، دارای عمق ۳۰µm و پهنای ۱۲۰ µm بود، که این مقادیر برای عمیق ترین حفره ایجاد شده برروی کوپن Al-۱۱۰۰، برابر ۴۲µm و ۵۰µm تعیین گردید.

برای رد یا قبولی سوختهای هسته‌ای که دچار خوردگی شده‌اند، موسسه ایمنی هسته ای NAC آزمایش Sipping test را پیشنهاد داده است. بعد از انجام این آزمایش و تعیین میزان نرخ نشتی سوخت مذکور در دو زمان مختلف، اگر اختلاف میزان نشتی در این دو زمان، از۲ برابر میزان نشتی در لحظه t =۰ بیشتر بود سوخت بعنوان سوخت معیوب شناخته شده و به واحد بازفرآوری فرستاده می شود[۲]. با توجه به اینکه درصد بسیار بالایی از خوردگی ایجاد شده بر روی غلاف سوختهای هسته‌ای در اثر رسوب و نشست ناخالصیها، اعم از ناخالصیهای داخل آب، گرد و غبار هوا و سایر منابع آلوده کننده آب می باشند، پیشنهاد می گردد از Skimmerهای مکنده در استخر خود راکتور و استخر ذخیره سازی سوختهای مصرف شده استفاده گردد. امروزه در اغلب استخرهای هسته ای برای فرستادن آب به واحد تصفیه (Demineralizer) از این نوع Skimmer ها استفاده می کنند. این دستگاهها در سطح آب و کناره لبه استخر نصب شده و از بالاترین سطح آب که دارای بیشترین میزان آلودگی است، آب را مکش کرده و به واحد دمینرالایزر می فرستند.

References:

1.Corrosion Monitoring of Aluminium Alloys in the TRIGA IPR-R1 Research Reactor, C.F.C,Neves,M.M.A.M.Schvartzman,Centre for Development of Nuclear Energy (CDTN) ,National Commission of Nuclear Energy(CNEN), Minas Gerais,Brazil

2. "Corrosion of Research Reactor Aluminium Clad Spent Fuel in Water" Technical Reports Series No:418 ,IAEA,VIENNA,AUSTRIA.

3. Corrosion Surveillance Programme for Latin American Research Reactor Al-clad Spent Fuel in Water,R.Haddad.

4."Operation of Spent Fuel Storage Facilities" Safety Series No.117 , IAEA ,VIENNA